

混合粒径漂砂量算定式の新たな提案

Mohammad Dibajnia*・橋村 嘉之**・喜岡 渉***

1. はじめに

養浜後の混合粒径砂海浜の地形変化予測にあたっては混合粒径砂の移動機構解明による漂砂量算定法の確立が重要な課題である。近年、混合粒径砂の研究が行われるようになり、その移動機構は徐々に明らかになっている。佐藤ら(2000)はこれらの移動機構の違いを考慮し、Dibajnia・Watanabe の漂砂量算定式をもとに混合粒径砂漂砂量算定式を提案しているが、その検証データは規則波の狭い範囲に限られているうえ、その基となる Dibajnia・Watanabe (1996) の式は波・流れ共存場では漂砂量を正しく評価できないため、広範囲では適用できない。そこで、本研究では広範囲の実験データを用い、より一般性のある漂砂量算定式を提案し、さらに、中村ら(2001)の2粒径混合砂海浜断面の地形変化実験データを用いて新しい漂砂量算定式の検証を行うことを目的とする。

2. 漂砂量算定式 (均一粒径砂)

(1) Dibajnia・Watanabe (1996) の式

均一粒径砂の漂砂量を精度良く表わすことができるモデルとして Dibajnia・Watanabe (1996) が提案した以下の式がある。

$$\phi = \frac{q(1-\epsilon)}{w_0 d} = 0.0015 \cdot \text{sign}(\Gamma) \cdot |\Gamma|^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ϕ ：無次元漂砂量、 q ：単位幅漂砂量、 ϵ ：砂の間隙率、 w_0 ：砂の沈降速度、 d ：粒径である。

Γ は砂の移動メカニズムを表すパラメータで以下のよう

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^3 + \Omega_t^3) - u_t T_t (\Omega_c^3 + \Omega_t^3)}{(u_c + u_t)(T_c + T_t)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 T_i ：(添字 i は c または t で置き換えられる) 岸向き (沖向き) 流速の継続時間、 u_i ：岸向き (沖向き) 流速の自乗平均流速振幅、 Ω_i ：岸向き (沖向き) 流速時に巻き上げられ岸向き (沖向き) 流速時に沈降する砂の総量、 Ω_i ：岸向き (沖向き) 流速時に巻き上げられ流速

反転後の沖向き (岸向き) 流速時に沈降する砂の総量である。 u_c 、 u_t 、 Ω_c 、 Ω_t は次式で与えられる。

$$u_c^2 = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c} u^2 dt, \quad u_t^2 = \frac{2}{T_t} \int_{T_c}^T u^2 dt \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_i = \frac{1}{2} \frac{u_i^2}{sgw_0 T_i} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_i &= \omega_i \cdot T_i \sqrt{\frac{sg}{d}} \\ \Omega_i &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ if } \omega_i \leq \omega_{cr}$$
$$\left. \begin{aligned} \Omega_i &= \omega_{cr} \cdot T_i \sqrt{\frac{sg}{d}} \\ \Omega_i &= (\omega_i - \omega_{cr}) \cdot T_i \sqrt{\frac{sg}{d}} \end{aligned} \right\} \text{ if } \omega_i > \omega_{cr} \dots\dots\dots (5)$$

ω_{cr} は砂漣上で 0.03、シートフロー状態で 1.00 ある。 ω_i は岸向き (沖向き) 流速によって巻きあがった砂が落ちるまでの時間 T_{fall} と岸向き (沖向き) 流速の継続時間 T_i の比を表す。

(2) 砂の移動限界と移動形態

底面摩擦応力は砂の移動形態を識別するのに重要なパラメータである。この底面摩擦応力を表す無次元量であるシールズ数 Ψ は次式で与えられる。

$$\Psi = \frac{f_w u_i^2}{2sgd} = f_w \theta_i \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 f_w ：摩擦係数、 s ：砂の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：砂の粒径である。シールズ数がある一定の値に達す

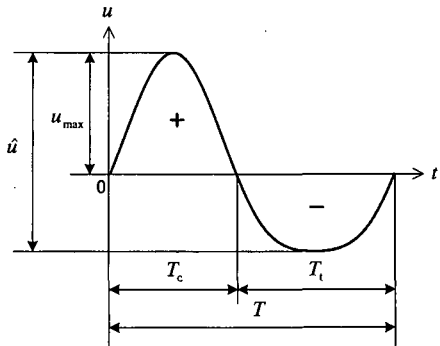


図-1 各パラメータ

* 正会員 工博 Baird & Associates
** 工修 中日本建設コンサルタント株式会社 構造設計室
*** 正会員 Ph.D 名古屋工業大学教授 社会開発工学科

ると底質は静止状態から移動状態に移る。この限界シールズ数 $\psi_{cr} = f_w \theta_{cr}$ を考慮すると ω_i は次式となる。

$$\omega_i = (\theta_i - \theta_{cr}) \cdot \frac{d}{w_0 T_i} \quad (7)$$

ただし、 ω_i が負となる場合は $\omega_i = 0$ とする。

さらに、砂の移動形態は波高もしくは底面流速が大きくなるにつれ掃流状態、砂漣上の浮遊状態、平らになった砂面上のシートフロー状態の順に移移する。しかし、シートフロー状態となるようなシートフロー限界シールズ数を ψ_{sheet} とすると、シートフロー時には底面摩擦応力がどの半周期の間にもこの値を超えているわけではなく、半周期によって平らな砂面上に不完全なシートフローが起きている場合もある。 Ω_i を次式によって補正すればこれを考慮できる。

$$\Omega_i = \left(\frac{\psi_i - \psi_{cr}}{\psi_{sheet} - \psi_{cr}} \right)^3 \cdot \Omega_i \quad \text{if } \psi_i < \psi_{sheet} \quad (8)$$

Dibajnia・Watanabe (1996) は Ω_i の3乗を導入することによってこのような移動形態を考慮している。

(3) 新しい漂砂量算定式の提案

Dibajnia・Watanabe (1996) の式では波・流れ共存場での漂砂量を正しく評価できないことがわかったので、底質の移動限界にあたる移動限界流速 u_{cr} を使ってこれについて説明する。

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{\psi_{cr}}{2f_w}} sgd \quad (9)$$

図-2に、 $T_c = T_i = T/2$, $u_t < u_{cr}$ ($\Omega_i = \Omega'_i = 0$), $\omega_c < \omega_{cr}$ ($\Omega'_c = 0$) となるような流速波形①と、流速波形①の流速が正となる部分だけを取り出し周期 $T/2$ の波として定義した流速波形②を示す。以上の条件で、流速波形①は流速波形②の2倍の周期であるから、無次元漂砂量は流速波形②の半分になることがわかる。

そこで、流速波形①について Dibajnia・Watanabe (1996) の式に移動限界流速を導入し無次元漂砂量を求めてみると以下のように与えられる。

$$\Gamma = \frac{T_c \Omega_c^3}{(1 + u_t/u_c) 2 T_c} = \frac{\Omega_c^3}{2} \quad (10)$$

$$\phi = 0.0015 \cdot \sqrt{\frac{\Omega_c^3}{2}} \quad (11)$$

次に流速波形②についても同様に以下のように与えられる。

$$\Gamma = \frac{u_c T_c \Omega_c^3}{u_c (T_c + T_i)} = \Omega_c^3 \quad (12)$$

$$\phi = 0.0015 \cdot \sqrt{\Omega_c^3} \quad (13)$$

式(11)と式(13)より流速波形①の無次元漂砂量は流速波形②の $1/\sqrt{2}$ 倍となっており矛盾が生じる。これは、一周平均の漂砂量を求めるためにパラメータ Γ の

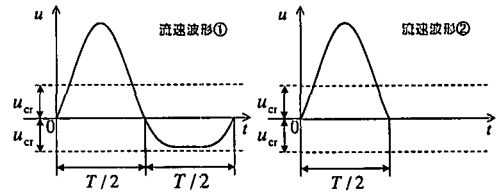


図-2 流速波形

分母を $(T_c + T_i)$ としているが、無次元漂砂量を求める際に Γ の平方根をとるため時間の影響が正しく反映されていないためである。そこで、時間の影響を正しく反映でき、かつ、 Γ の平方根をとらなくても無次元漂砂量が流速の3乗に比例するように新しく漂砂量算定式を次式で与えた。

$$\phi = \frac{q(1-\epsilon)}{w_0 d} = a \cdot \frac{u_c T_c (\Omega_c + \Omega'_c) - u_t T_i (\Omega_i + \Omega'_i)}{(T_c + T_i) \sqrt{sgd}} \quad (14)$$

この式中の各パラメータは前述の Dibajnia・Watanabe (1996) の式と同じである。ただし、定数 a は以下で述べる既存の実験データとの比較により最適値 0.0020 を得ている。

この新しい漂砂量算定式を検証するために均一粒径漂砂 (粒径 0.13~0.32 mm) の実験データとの比較を行った。実験データには、Dibajnia・渡辺 (1991), Al-Salem (1993), Ribberink & Chen (1993), Ramadan (1994), Katopodi et al. (1994), Ribberink (1995), Janssen et al. (1996), Janssen & van der Hout (1997) を用いた。図-3に無次元漂砂量の実験値 ϕ_{meas} と計算値 ϕ_{cal} を比較したグラフを示す。図中の直線は、勾配がそれぞれ 1.5, 1.0, 0.5 のもので、計算値が実験値に対して $\pm 50\%$ となる範囲を示す。なお、漂砂量の計算には移動限界シールズ数 $\psi_{cr} = 0.05$, シートフロー限界シールズ数 $\psi_{sheet} = 0.80$, 摩擦係数 $f_w = 0.01$, $\omega_{cr} = 1.2$ を用いた。この図より、粒径の違いによらず漂砂量の計算値と実験値との一致がよく、新しい漂砂量算定式が均一粒径砂の漂砂量を評価できることがわかる。

3. 混合粒径漂砂への適用

混合粒径砂は異粒径間の干渉により均一粒径砂とは異なる移動形態をとる。基本的には、細砂が少ない時には粗砂が細砂層の上を滑りやすくなり、細砂が多い時も粗砂がそれに巻き込まれ動くため、どちらの場合でも粗砂の動きは粗砂存在率と比べて活発となる。一方、細砂の動きは緩和され、特に粗砂含有率が 50% を超えると非常に少なくなる。混合粒径砂の漂砂量を精度良く予測するためには、このような移動形態の違いを新しい漂砂量算

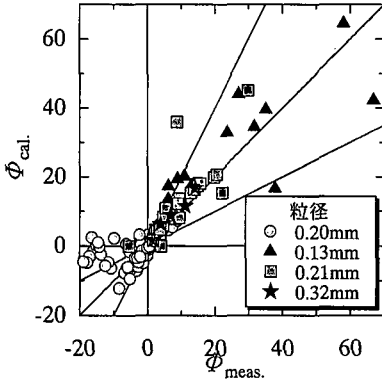


図-3 無次元漂砂量の実験値と計算値

定式に取り入れる必要がある。そこで広い粒度分布をもつ底質においても適用可能となるように Egiazaroff (1965) を参考にして粒径比 d_r/d_m をパラメータとして導入することにした。なお、 d_r は対象粒径、 d_m は平均粒径である。

異粒径底質間の干渉による砂の巻き上がり高さの変化を考慮するために、新しい漂砂量算定式において流速反転時の砂の巻き上がりを受け渡しを決めるパラメータである ω_{cr} を次式で与えた。

$$\alpha = \left(\frac{d_r}{d_m} \right), \quad d_m = \sum P_r d_r \quad (15)$$

$$\omega_{cr} = 1.2\alpha^{-0.7} \quad (16)$$

ここで、 P_r は混合粒径砂中の対象粒径の含有率である。また、混合砂中の粗砂 ($d_r/d_m \geq 1.0$) は細砂の影響で動きやすい状態となると考えられるため、粗砂の場合は Ψ_{cr} 、 Ψ_{sheet} を均一粒径砂の時よりも小さくするために次式によって与えた。

$$\Psi_{cr} = 0.05 P_r \quad (17)$$

$$\Psi_{sheet} = 0.8\alpha^{-0.3} \quad (18)$$

さらに、混合粒径砂中の対象粒径の含有率(存在確率) P_r による移動量の変化を次式によって考慮した。

$$\phi = 0.0020 \cdot \frac{u_c T_c (\Omega_c + \Omega_i) - u_i T_i (\Omega_i + \Omega_c)}{(T_c + T_i) \sqrt{sgd}} \cdot P_r \quad (19)$$

この式が混合粒径漂砂を評価できるかを検証するために振動流装置による2粒径混合漂砂実験(表-1参照)との比較を行った。その結果を図-4、図-5に示す。これらより、粗砂、細砂ともに計算値が実験値とほぼ一致しており新しい漂砂量算定式によって混合粒径漂砂が評価できることがわかる。

4. 断面地形変化実験

この新しい漂砂量算定式が海浜断面地形変化実験における漂砂量を正しく評価できるかどうかを検討するため

表-1 実験データ

Ref.	粒径 (mm)		流速波形
	粗砂	細砂	
Cloin, B. (1998)	0.32	0.13	2nd-order stokes sawtooth sinusoidal
乾ら (1995)	0.87	0.20	1st-order cnoid
Dibajnia ら (1998)	0.80	0.20	1st-order cnoid
渡辺ら (1999)	0.80	0.20	1st-order cnoid
佐藤ら (2000)	0.80	0.20	1st-order cnoid

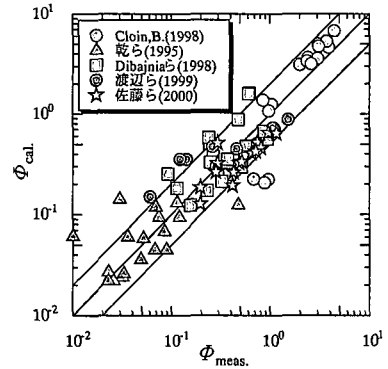


図-4 無次元漂砂量の実験値と計算値の比較(粗砂)

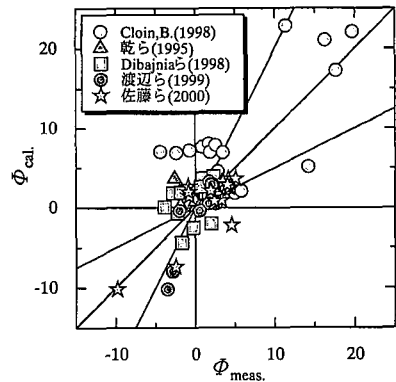


図-5 無次元漂砂量の実験値と計算値の比較(細砂)

に中村ら (2001) の実験データを用いて検証を行った。この実験は中央粒径 0.11 mm の細砂と 0.34 mm の粗砂を 1:0, 3:1, 1:1, 0:1 の割合で混合し、入射波として不規則波の侵食型 ($H_{1/3}=32.8$ cm, $T_{1/3}=2.7$ s) を 20 時間作用させている。

この実験では底質のサンプリングにより得られる混合率分布と砂面計により計測された地形変化より、ある断

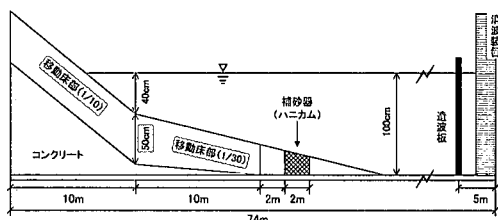


図-6 実験水路 (中村ら, 2001)

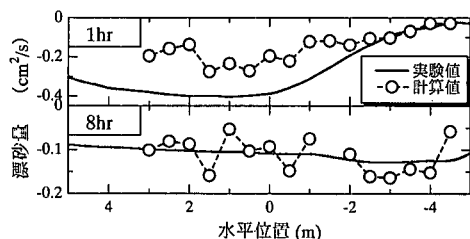


図-7 漂砂量の実験値と計算値 (細:粗=1:0)

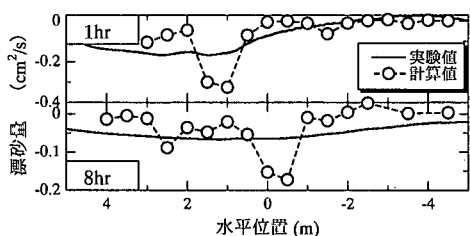


図-8 漂砂量の実験値と計算値 (細:粗=0:1)

面の岸側と沖側にある粗砂・細砂それぞれの砂の量が与えられる。その変化量よりある断面における漂砂量が算出される。この漂砂量と流速計の計測データから新しい漂砂量算定式で計算した漂砂量との比較を行った(図-7～図-10)。なお、水平位置とは、移動床の勾配変化点を0とし、それより岸側を「+」、沖側を「-」としている(図-6参照)。

均一粒径砂のグラフ(図-7, 図-8)より、計算値と実験値がほぼ同じ傾向を示しているのがわかる。次に、混合砂についてのグラフ(図-9, 図-10)をみると、8hrの細砂漂砂量は実験値よりも計算値の方がそのピークが岸側になっている。これは実験では岸側は粗砂のアーミング効果により細砂が移動しにくい状態であったためだと考えられる。その他は計算値と実験値が一致しており、新しい漂砂量算定式が断面地形変化実験の漂砂量を評価できることがわかる。

5. おわりに

本研究では混合粒径砂の新たな漂砂量算定式を提案

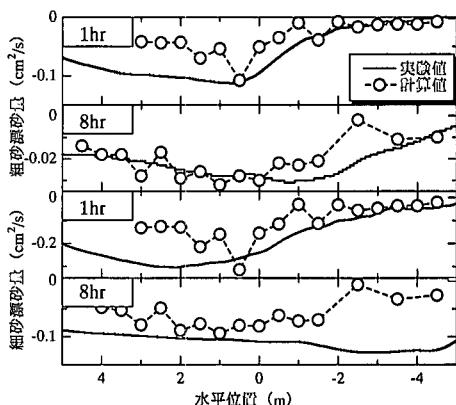


図-9 漂砂量の実験値と計算値 (細:粗=3:1)

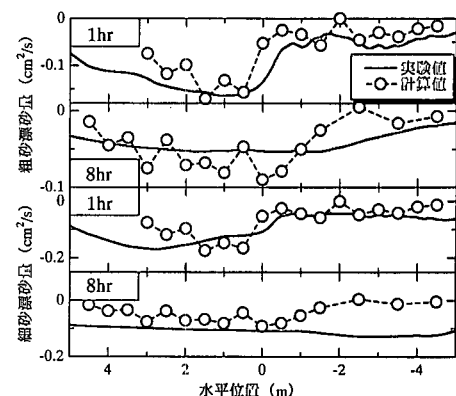


図-10 漂砂量の実験値と計算値 (細:粗=1:1)

し、振動流装置による既往の実験データと、2粒径混合砂海浜地形変化実験結果との比較によりその妥当性を確かめた。

なお、比較に用いた実験データは中部電力(株)電力技術研究所研究主査 依田 眞氏に提供いただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 乾 武史・Mohammad Dibajnia・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 521-525.
- 佐藤順司・田中正博・樋川直樹・渡辺 晃・磯部雅彦 (2000): 混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 486-490.
- 沢本正樹・山下俊彦 (1985): 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, No. 363, pp. 195-204.
- 鈴木高二郎・渡辺 晃・磯部雅彦・Mohammad Dibajnia (1994): 振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 356-360.
- 中村昭男・依田 眞・橋川正男・早瀬松一 (2001): 不規則波による混合砂海浜変形についての2次元水路実験, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 571-575.

- 渡辺 晃・磯部雅彦・Mohammad Dibajnia・田中正博・植村勇仁 (1999): 非対称振動流作用下における混合粒径砂の移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 521-525.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1991): 非対称振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 236-240.
- Mohammad Dibajnia・高沢大志・渡辺 晃 (1998): 混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 481-485.
- Al-Salem, A. A. (1993): Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet flow conditions, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.
- Cloin, B. (1998): Gradation effects on sediment transport in oscillatory sheet-flow, M.Sc. Thesis, Delft University of Technology.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under non-linear waves and currents, Proc. 23 rd. Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 2015-2028.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1996): A transport rate formula for mixed-size sands, Proc. 25 th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 3791-3804.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentration., Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 91, HY 4, pp. 225-246.
- Janssen, C. M., W. N. Hassan, R. v. d. Wal, J. S. Ribberink (1996): Net sand transport rates and transport mechanisms of fine sand in combined wave-current sheet flow conditions., Data Report H2462, Part IV, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Janssen, C. M. and G. van der Hout (1997): Sediment transport for two sands with different grain diameters under combined wave-current sheet flow conditions., Data Report Z2137, Part I, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Katopodi, I., J. S. Ribberink, P. Ruol, H. Koelewijn, C. Lodahl, S. Longo, A. Crosato and H. Wallace (1994): Intra-wave sediment transport in an oscillatory flow superimposed on a mean current., Data Report H 1684, Part III, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Ramadan, K. A. H. (1994): Time-averaged sediment transport phenomena in combined wave-current flows., Report H1889.11, Part I, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Ribberink, J. S. and Z. Chen (1993): Sediment transport of fine sand under asymmetric oscillatory flow., Report H840, Part VII, Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Ribberink, J. S. (1995): Time-averaged sediment transport phenomena in combined wave-current flows., Report H1889.11, Part II, Delft Hydraulics, The Netherlands.
-